

ОТРИМАННЯ ПЕРЕВ'ЯЗОЧНИХ МАТЕРІАЛІВ З НАНОЧАСТИНКАМИ СРІБЛА ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ ФІЗИЧНОГО ОСАДЖЕННЯ У ВАКУУМІ**О. В. Горностай**

Державне Підприємство «Міжнародний Центр електронно-променевої технології Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України»

ORCID: 0000-0003-4961-7397

Представлені технологічні варіанти отримання дискретних наноструктурних покриттів срібла на поверхні медичного бинта з середнім розміром 25 нм і дисперсністю 10–120 нм. Синтез наночастинок був реалізований за допомогою методу електронно-променевого випаровування з подальшим осадженням направлено парового потоку на поверхню мішені (бинта) у вакуумі. Вивчено структуру, морфологію, концентрацію отриманих наночастинок. Розроблена технологія дозволяє отримувати дискретні покриття на поверхні перев'язочних матеріалів та інших текстильних виробів. Таким чином в розрізі практичного застосування отриманих наночастинок та композицій на їх основі можна розділити на наступні напрямки: надання або посилення протівірусних та протимікробних властивостей новим або існуючим виробам медичного призначення.

Ключові слова: наночастинки, електронно-променева технологія, композити, вакуум, випарник, бинт, срібло, мідь, перев'язочні матеріали.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Перев'язочні матеріали використовуються при лікуванні поверхневих та глибоких ран, включаючи пролежні, венозні трофічні виразки, діабетичні виразки, опіки, реципієнтні ділянки при пересадці шкіри, загоєнні інфікованих ран та хронічних ран [1]. Як правило, перев'язочні матеріали виконують комплексну задачу, тому сучасні перев'язочні матеріали є багатошаровими виробами з, так званою сендвіч-структурою, які володіють рядом властивостей: атравматичними, абсорбуючими, біосумісними, протимікробними [2, 3]. В багатошаровій структурі пов'язки протимікробний шар відповідає за забезпечення ефективного захисту від контамінації патогенними мікроорганізмами з навколишнього середовища і від мікробів присутніх у рані, знижуючи ризик її вторинного інфікування, сприяючи таким чином, якнайшвидшому загоєнню рани [4]. У якості матеріалів даного шару застосовуються деякі антибіотичні препарати, такі як: хлорамфенікол, гентаміцин, неоміцин і бацитрацин. Однак рутинне (постійне) застосування місцевих антибіотиків призводить до прогресуючого зниження терапевтичної ефективності цих антибіотиків через антимікробну резистентність [5]. Також, інфекції, які переростають у хронічний стан важко піддаються лікуванню за допомогою антибіотиків [3]. Вважається, що основна біологія полягає в здатності бактерій утворювати біоплівки. Численні дослідження задокументували, що такі агреговані спільноти більш стійкі до різноманітних антибіотиків і дії імунної системи порівняно з їх планктонними аналогами [6, 7].

Тому, існує гостра потреба в розробці нових підходів для лікування інфікованих ран, яка може бути вирішена шляхом кооперації зусиль медиків, хіміків та матеріалознавців.

Розвиток нанотехнологій виявив ряд унікальних властивостей наночастинок металів, що не притаманні для масивних об'єктів. Одним із таких властивостей є біологічна активність наночастинок срібла Ag проти широкого спектру бактерій, вірусів та еукаріотичних мікроорганізмів [3, 8, 9].

Відомо, що властивості наночастинок залежать від розміру, форми, дисперсності, концентрації, схильності до агрегації (стабільності у часі) та методу отримання [10]. Існуючі методи хімічного синтезу, або механічного подрібнення, супроводжуються, в процесі отримання наночастинок, використанням відновників, стабілізаторів продуктів хімічних реакцій та присутністю інших домішок [11]. Оскільки в області медицини, фармації – недопустима наявність навіть найменших домішок, перспективними є методи фізичного осадження у вакуумі, позаяк вони позбавлені цих недоліків. Серед методів фізичного осадження у вакуумі привертає увагу метод електронно-променевого випаровування і фізичної конденсації пари (метод EB-PVD). Він добре себе зарекомендував при виробництві твердих неорганічних композитів, матеріалів та покриттів, тому з легкістю може бути адаптований для синтезу нанорозмірних структур. В роботах [12, 13] продемонстрована можливість застосування методу EB-PVD для синтезу наночастинок Ag та Cu в діапазоні розмірів 20–40 нм в рідких матрицях на основі: мономерів, прекурсорів поліуретану, жирних олій та синтетичних масел. Також, представлена можливість отримання дискретних покриттів з Ag та Cu нанометрового розміру на порошках і гранулах різної дисперсності [14].

Відомо, що перша комерційна пов'язка Ziehl-Abegg для ран з наночастинками Ag була представлена для масового використання компанією Acticoat™ у 1998 році, але ризики викликані з потенційною цитотоксичністю наночастинок Ag завадила її широкому використанню [15]. Щоб запобігти таким потенційним ризикам потрібно уникнути безпосереднього контакту наночастинок Ag з рановим ложем [2]. Сучасні перев'язочні матеріали для ран у формі сендвіч-структури забезпечать баланс антимікробної активності та біосумісності [2, 16]. За умови, що наночастинки срібла не просто будуть нанесені на поверхню функціонального антибактеріального шару, а надійно зафіксовані там. Так, наприклад, в роботах [17, 18] виготовлення перев'язочних матеріалів відбувалось у два етапи – так званим «мокрим» методом. Спочатку

отримувались наночастинки срібла у вигляді дисперсної системи на основі ізопропанолу та інших дисперсних середовищ. За допомогою якого, на другому етапі, шляхом пропитування, відбувалось нанесення наночастинок на поверхню перев'язочного матеріалу. На думку автора даної роботи зазначений підхід не забезпечує надійну фіксацію наночастинок, що може викликати ризики пов'язані з потенційною цитотоксичністю наночастинок. Тому, більш перспективний є інший підхід, а саме: безпосереднє осадження парового потоку на поверхню перев'язочного матеріалу, що забезпечить надійну фіксацію наночастинок. Таким чином, ризики пов'язані з цитотоксичністю наночастинок Ag будуть зведені до мінімуму, а використання фізичного осадження у вакуумі забезпечить хімічну чистоту отриманих наночастинок.

Мета роботи: адаптувати електронно-променеове обладнання для отримання нанорозмірних структур срібла на поверхні перев'язочних матеріалів з можливістю контролювати розмір та концентрацію отриманих наночастинок. Визначити морфологію, форму, розподіл за розміром та концентрацію отриманих наночастинок срібла.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Електронно-променеове випарування в вакуумі відрізняється від інших методів вакуумного випарування – термічного та іонно-плазмового – перш за все, своєю продуктивністю, універсальністю, технологічною гнучкістю та економічністю. Електронний промінь – один із найефективніших джерел нагрівання. При зіткненні вільного електрона з поверхнею твердого тіла основна доля його кінетичної енергії перетворюється в теплову енергію в поверхневому шарі товщиною 1–2 мкм. Тому при нагріванні електронним променем джерело тепла знаходиться в самому тілі і забезпечує максимальне повне перетворення кінетичної енергії в теплову енергію. Слід також зазначити, що технологічні варіанти електронно-променевого випарування та конденсації практично не супроводжуються викидом шкідливих парів і газів у навколишнє середовище. Сучасні джерела електронів – електронно-променеві гармати потужністю 50–100 кВт – дозволяють випаровувати прямим електронним променем металеві матеріали зі швидкістю 1,0–3,0 кг/год [19, 20].

На рис. 1 показана схема технологічного варіанта електронно-променевого випарування та осадження направлено парового потоку металу з одного джерела на плоску горизонтальну поверхню бинта, що переміщується за допомогою механізму перемотування. Процес осадження парового потоку відбувається зверху вниз. Такий варіант можливо реалізувати за рахунок використання випарників у формі «чайника» [21]. Ці випарники застосовуються для випарування багатьох металів, наприклад: золота, срібла, міді, заліза, нікелю, кобальту, церію, паладію, платини. Хоча їх продуктивність в отриманні пари менша ніж у випарників прямого дії (тиглів), але цілком достатньо для промислового виробництва дискретних покриттів нанометрового розміру. А також, цей варіант випарування дає

зможу формувати паровий потік заданої просторової орієнтації, насамперед зверху вниз, і реалізувати осадження пари на горизонтальні поверхні із ККД приблизно 50%, що важливо в разі осадження коштовних матеріалів (Cu, Ag, Au, Pt) [22].

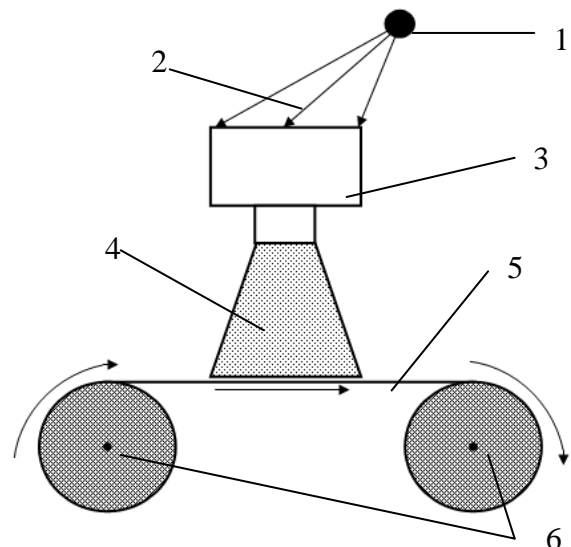


Рисунок 1 – Технологічна схема осадження з використанням графітового випарника та паропроводу, де 1 – генератор електронів; 2 – електронний промінь; 3 – випарник; 4 – паровий потік; 5 – медичний бинт; 6 – механізм перемотування та намотування

Застосовуючи два розташовані поруч випарника можна здійснювати одночасне, або послідовне випарування різних компонентів і осаджувати композиційні наноструктурні покриття, наприклад Ag-Cu у вигляді комплексу з наночастинок Ag та Cu або пошарово – Ag/Cu. При розташуванні другого джерела нижче поверхні бинта, що переміщується, можна реалізувати нанесення дискретного покриття на обидві поверхні перев'язочного матеріалу одночасно.

При проведенні експериментальних робіт у якості мішені було взято марлеві медичні бинти (ДСТУ EN14079:2009) виробництва ТОВ «Наша Вата», Україна, партія 2 тип 17, довжина 7 м, ширина 14 см. Кожен із них був перемотаний у невеликий рулон діаметром близько 3 см.

Осадження Ag здійснювали на лабораторній електронно-променевій установці УЕ-142 з випарником продуктивністю 10 г/год.

В процесі експериментальних робіт було впроваджено наступний технологічний режим осадження срібла для отримання оптимальної наноструктури на поверхні бинта. По-перше, була встановлена лінійна швидкість руху бинта при перемотуванні – 2 м/хв. Тобто, бинт із робочою довжиною 6 метрів обробляється 3 хвилини.

По-друге, витрата срібла. Тобто, кількість срібла, що випаровується за цей час, дорівнює близько 50 міліграм. Таким чином, за умови більшого діаметру вихідного рулону та безперервного процесу осадження за 1 годину буде оброблено 120 метрів бинта.

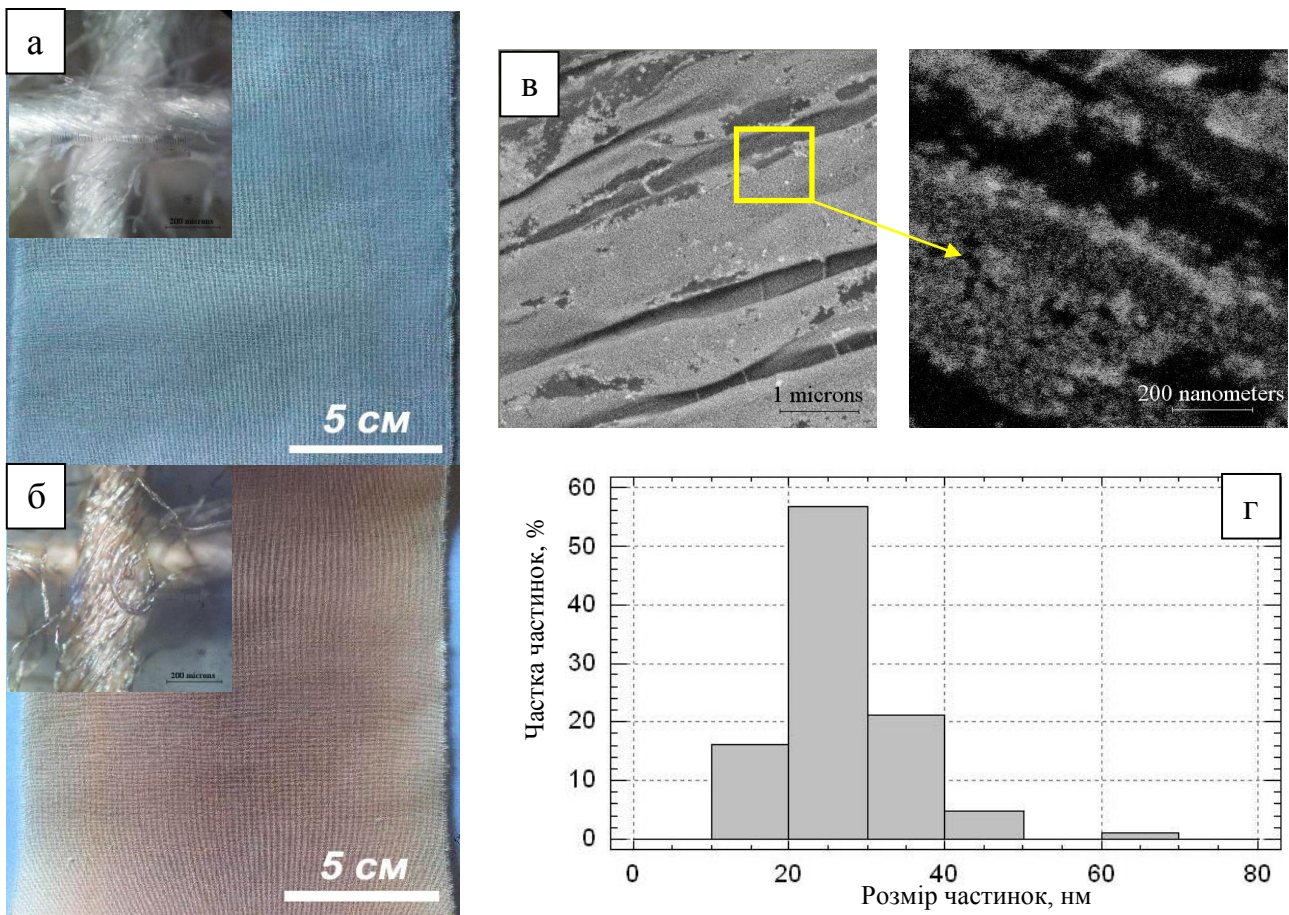


Рисунок 2 – Дослідження структури отриманих дискретних покриттів, де а – вихідний матеріал бинта; б – медичний бинт після «опромінення» направленим паровим потоком; в – зображення зразків бинт + Ag отримані за допомогою РЕМ; г – гістограми розподілу наночастинок срібла за розміром згідно зображень РЕМ

За один робочий день (5 годин роботи установки) – 600 метрів покритого бинта. Витрата срібла становитиме близько 5 грам.

У варіанті промислового обладнання цей параметр процесу осадження можна збільшити в 1,5–2 рази при одночасному збільшенні ширини тканини з 14 см до 0,5 м, що дозволяють розміри робочої камери.

Дослідження структури покриттів було здійснено сучасним методом аналізу: дисперсних структур. Макроструктуру вихідного чистого марлевого бинта і марлевого бинта з осадженим металом вивчали за допомогою металографічного мікроскопа Polivar-Met.

На рис. 2 а, б представлена макроструктура вихідного марлевого чистого бинта і марлевого бинта з осадженим металом. Як свідчать дані тримані з зображень, зміна макроструктури марлевого бинта після осадження на поверхню його срібла практично не спостерігається. Фіксується лише зміна кольору. Марлевий бинт після осадження на його поверхню срібла набуває світло-коричневого відтінку. Також можна відмітити незначний градієнт відтінку по краю марлевого бинта, що свідчить про нерівномірність розподілу парового потоку по поверхні медичного бинта.

Структурні характеристики, розмір та діапазон розподілу за розміром отриманих наночастинок на поверхні марлевого бинта досліджували за допомо-

гою растрової електронної мікроскопії (РЕМ) на мікроскопі фірми «Tescan» Vega3M зі збільшенням понад 100 000 крат. Була проведена обробка зображення мікроструктури шляхом визначення розмірів кожної частинки, підрахунку їх загальної кількості, підрахунку кількості частинок в інтервалі розмірів, що задається, і побудови гістограми розподілу за розмірами. Статистична обробка даних і побудова гістограми розподілу проводилася серед Statgraphics. На рис. 2в, г представлені результати цих вимірів.

На отриманих мікрофотографіях бинта з осадженим металом видно дискретне покриття на всій поверхні, що складається з нанорозмірних частинок срібла. Гістограма розподілу розміру частинок срібла представлена на рис. 2 г. Отримані результати свідчать, що середній розмір часток знаходиться між 20 та 30 нм, а діапазон розподілу наночастинок за розмірами в інтервалі 10–70 нм.

Для більшої достовірності отриманих розмірів частинок був застосований метод аналізу розміру частинок в рідких середовищах за допомогою методу лазерної кореляційної спектроскопії (ЛКС) (Dynamic light scattering) на приладі ZetaSize Nano-S («Malvern», Великобританія). Прилад обладнаний гелій-неоновим (He-Ne) лазером із довжиною хвилі 632,8 нм і потужністю 4 мВт. Діапазон вимірювання приладу складає від 1 нм до 20 мкм [23]. З цією метою були підготовлені дисперсні системи: відрі-

зок медичного бинта з покриттям срібла площею 70 cm^2 занурювався в 10 cm^3 деіонізованої води і витримувався протягом 1-ї доби. Встановлено (рис. 3 г), що отримана таким чином дисперсна система містила частинки в діапазоні від 10 до 90 нм з максимумом 24 нм. Їхня вагова частка складає 99%. Таким чином, розподіл за розміром на рис. 2 г і рис. 3 г корелюють, що підкреслює достовірність отриманих результатів і стабільність частинок срібла.

Для визначення морфології синтезованих наночастинок застосовували метод електронної мікроскопії. Роботи проводили на просвічуючому електронному мікроскопі (ПЕМ) НІТАСНІ Н-800 за прискорюючої напруги 100 кВ із роздільною здатністю: у просвічуючому режимі – 0,2 нм, растровому режимі – 3 нм. В процесі пробопідготовки були отримані зразки: у вигляді дисперсної системи з наночастинками, яку наносили на спеціальну вуглецеву сітку та потім висушувались на повітрі, після чого поміщали у ПЕМ. Результати електрон-

ної мікроскопії представлені на рис. 3 а, демонструють, що синтезовані наночастинки мають еліпсоїдну форму, яка, ймовірно, всього утворилась за рахунок коалесценції. Згідно побудованих гістограм (рис. 3 в) на основі отриманих мікрофотографій середній розмір наночастинок срібла становить 29 нм. Діапазон розподілу за розмірами знаходиться в інтервалі 5–120 нм. Детальний аналіз отриманих електронограм (рис. 3 б) свідчить про присутність срібла з полікристалічною структурою. Це пояснюється присутністю концентричних кілець на електронограмі, які утворені із окремих точок, що відповідають окремим монокристалом з різною орієнтацією з яких складаються наночастинки. При застосуванні методів електронної мікроскопії на перший план виходить пробопідготовка, яка полягає у виокремленні наночастинок з діелектричної матриці та подальшою сушкою, що може призводити до агрегації наночастинок та вплинути на результати виміру їх розмірів.

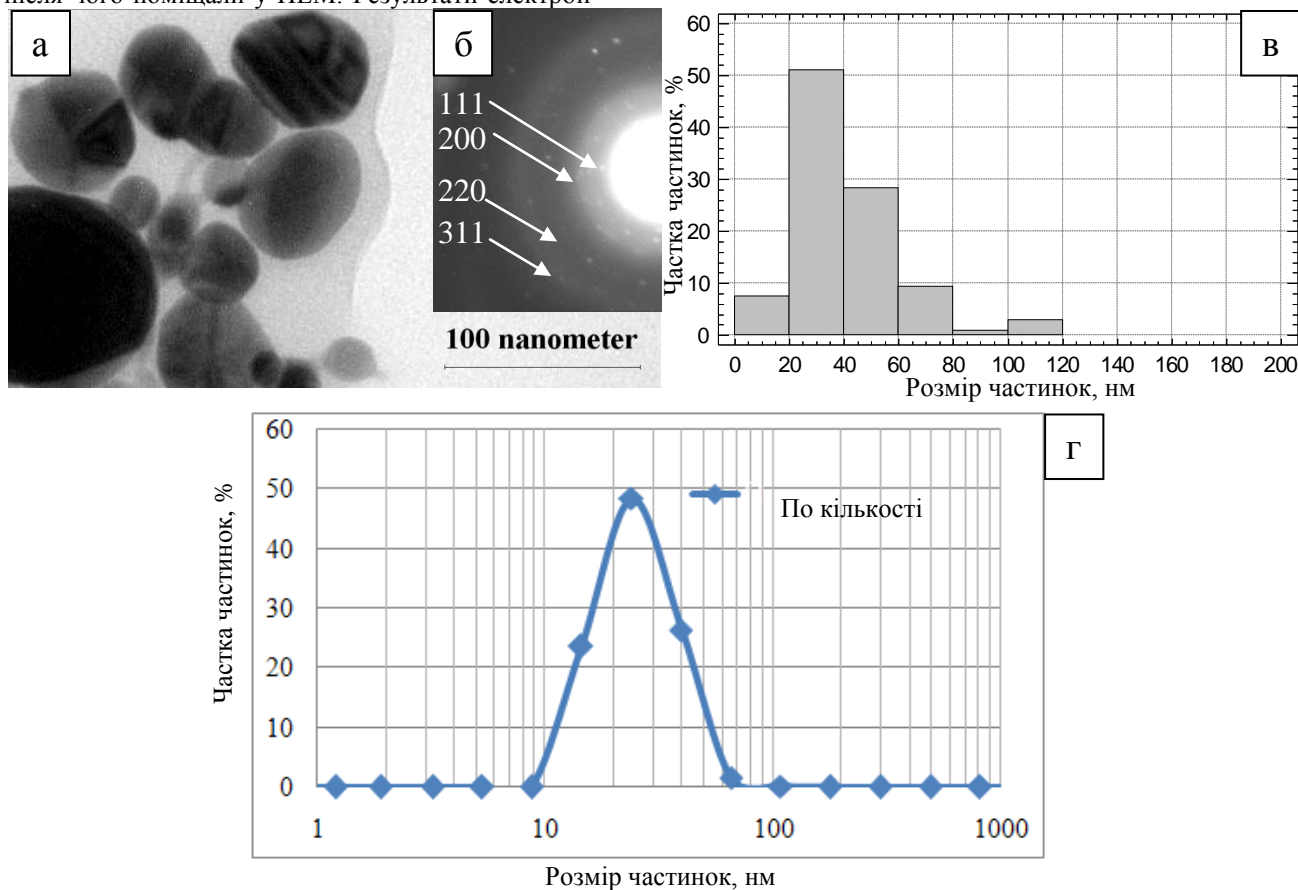


Рисунок 3 – Морфологія і структура отриманих наночастинок срібла, де а – фотографії отримані за допомогою ПЕМ; б – електронограми ПЕМ; в – гістограми розподілу за розміром побудовані на основі фотографій ПЕМ; г – розподілення наночастинок срібла за розміром отримане за допомогою метода ЛКС

Роботи по визначенню концентрації срібла і міді в дисперсних системах, були виконані в Інституті медицини праці НАМН України за допомогою методу атомноемісійної спектроскопії з індуктивно зв'язаною плазмою (АЕС ІСП) на приладі Optima 2 100 DV фірми PerkinElmer (США) згідно з методиками [24, 25]. Відповідно до отриманих результатів питома концентрація срібла приблизно дорівнює $0,3\text{--}1,19 \cdot 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$. Діапазон концентрації срібла

можна регулювати в межах $0,3\text{--}10 \cdot 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$. Максимальна концентрація обмежена площею робочої поверхні бинта, подальше збільшення концентрації призводить до утворення суцільної плівки в мікронному діапазоні розмірів, яка, згідно літературних джерел, не проявляє біологічно активних властивостей.

ВИСНОВКИ. Проведені результати дослідження демонструють можливість застосування елект-

ронно-променевої технології осадження дискретних нанорозмірних покриттів срібла із середнім розміром частинок 25 нм і дисперсністю 10–120 нм на поверхні стерильних марлевих бинтів. Встановлені закономірності формування структури можуть бути основою для технічно керованого синтезу наночастинок металів на поверхні текстильних матеріалів з заданою концентрацією. Існуюче дослідно-промислове і промислове електронно-променево обладнання може бути легко адаптоване до виробництва зазначених матеріалів. Слід особливо відзначити, що всі процеси здійснюються у вакуумі і не призводять до можливого пошкодження структури підкладки та не супроводжуються викидами шкідливих парів та газів у навколишнє середовище.

ЛІТЕРАТУРА

- Burrell R. E., Morris L. R. Anti-microbial coating for medical devices / US 5681575A. – 1997.
- Cai H., Xiaofei L., Ziyi Z. Harnessing biocompatible nanofibers and silver NPs for wound healing : Sandwich wound dressing versus commercial silver sulfadiazine dressing. *Materials Science & Engineering*. 2021. №128. – P. 1–11.
- Choudhurya H., Pandeya M., Qing Y. L. Silver nanoparticles : Advanced and promising technology in diabetic wound therapy. *Materials Science & Engineering*. 2020. №112. P. 1–16.
- Dumville J. C., Gray T. A., Walter C. J. Dressings for the prevention of surgical site infection. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2016. №12. P. 1–12.
- McHugh S., Corrigan M., Hill A. The role of topical antibiotics used as prophylaxis in surgical site infection prevention. *Journal Antimicrob Chemother*. 2011. №66. P. 693–701.
- Borges A., Serra S., Cristina A. A. Evaluation of the effects of selected phytochemicals on quorum sensing inhibition and in vitro cytotoxicity. *Biofouling*. 2014. №2. P. 95–183.
- Donlan R., Costerton J. Biofilms : survival mechanisms of clinically relevant microorganisms. *Clin Microbiol*. 2002. №15. P. 167–193.
- Elechiguerra J., Burt J., Morones J. Interaction of silver nanoparticles with HIV-1. *Journal Nanobiotechnology*. 2005. №3. P. 3–6.
- Marambio J., Hoek E. A review of the antibacterial effects of silver nanomaterials and potential implications for human health and the environment. *Journal Nanopart Res*. 2010. №12. P. 1531–1551.
- Горностай О. В. Еволюція стабільності наночастинок Ag та Cu в дисперсних системах отриманих методом фізичного осадження у вакуумі. *Технічні науки та технології*. 2021. №3(25).
- Вершок А. Б., Дормашев А. Б., Маргулев И. Я. Получение нанопорошков вакуумным импульсно-дуговым методом. *Вопросы атомной науки и техники*. 2006. №2. P. 31–40.
- Savelyev Yu., Gonchar A., Movchan B., Gornostai O., Vozianov S., Rudenko A., Rozhnova R., Travinskaya T. Novel biologically active polyurethane materials containing silver and copper nanoparticles *Полимерний журнал*. 2016. Т. 38. № 3. P. 255–260.
- Makhynia L. M., Movchan B. O., Gornostai O. V. Effect of silver nanoparticles on the physical and chemical properties of plant oil sand the antimicrobial activity. *BIOTECHNOLOGIA ACTA*. 2017. №6. P. 35–44.
- Ковинский И. С., Горностай А. В. Наноразмерные дискретные покрытия оксида меди на кристаллах хлорида натрия, осажденные из паровой фазы в вакууме. *Современная электрометаллургия*. 2012. № 2Ф. С. 50–52.
- Dressings : Absorbent ACTICOAT™ 7 anti-microbial dressing with silver nanocrystals SILCRYST™. Smith & Nephew Medical Limited. 2013. URL: <https://www.smith-nephew.com/key-products/advanced-wound-management/acticoat/> (дата звернення: 01.12.2021).
- Kirketerp-Moller K., Zulkowski K., James G. Chronic Wound Colonization. Infection and Biofilms. Biofilm Infections. Denmark. Koege : Koege University Hospital. 2011. P. 1–24.
- Довнар Р. И. Антибактериальный эффект бинта медицинского марлевого, содержащего наночастицы серебра или золота, при одновременном воздействии лазерного излучения. *Журнал Гродненского государственного медицинского университета*. 2011. №4. С. 46–49.
- Довнар Р. И. Антибактериальный и противогрибковый эффект перевязочного материала, содержащего наночастицы серебра. *Новости хирургии*. 2010. Т. 18. № 6. С. 3–11.
- Movchan B. A. Inorganic materials and coatings produced by EB PVD. *Surface Engineering* 2006. Vol. 22. P. 35–46.
- Мовчан Б. А., Ковинский И. С. Наноструктурные покрытия серебра и меди на порошках неорганических и органических веществ, осаждаемые из паровой фазы в вакууме. *Физико-технические проблемы современного материаловедения*. 2013. Т. 2. С. 127–139.
- Мовчан Б. О., Яковчук К. Ю. Пристрій та спосіб електронно-променевого випарювання й спрямованого осадження парового потоку на підкладку у вакуумі : пат. 98085 Україна : С23С 14/24, С23С 14/28, С23С 14/30/ № а 2011 06568 ; заявл. 25.01.2012 ; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7. – 7 с.
- Movchan B. A. Discrete nanosized metallic coatings produced by EB-PVD. *Surface Engineering*. 2016. №32. С. 258–266.
- Tomaszewska E., Soliwoda K., Kadziola K. Detection Limits of DLS and UV-Vis Spectroscopy in Characterization of Polydisperse Nanoparticles Colloids. *Journal of Nanoparticles*. 2013. С. 1–10.
- Методические указания 4.1.148203 «Определение химических элементов в биологических средах и препаратах методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой». Москва : Минздрав России, 2003. 16 с.

25. Томсон М., Уолш Д. Н. Руководство по спектрометрическому анализу с индуктивно свя-

занной плазмой. Москва : Недра, 1988. 288 с.

PREPARATION OF BANDING MATERIALS WITH SILVER NANOPARTICLES USING VACUUM PHYSICAL DEPOSIT METHODS

O. Gornostai

State Run Company «International Center for Electron Beam Technologies of E.O. Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine»

ORCID: 0000-0003-4961-7397

Purpose. Adapt electron beam equipment to obtain nanosized silver structures on the surface of dressings with the ability to control the size and concentration of the resulting nanoparticles (NPs). Determine the morphology, form, size distribution and concentration of the obtained silver nanoparticles. **Methodology.** Modern methods of analysis are used in the work. Electron beam evaporation method with directional vapor deposition in vacuum was used to obtain nanoparticles on a flat surface. To determine the structural characteristics nanoparticles: the size of the phase formations, the morphology we were used methods: dynamic light scattering (DLS); transmission electron microscopy (TEM); the concentration of silver in dispersed systems was determined by the method of atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma (NPP ISP). **Results.** The results of the study demonstrate the possibility of using electron-beam deposition technology of discrete nanosized silver coatings with an average particle size of 25 nm and a dispersion of 10–120 nm on the surface of sterile gauze bandages. The established patterns of structure formation can be the basis for technically controlled synthesis of metal nanoparticles on the surface of textile materials with a given concentration. Existing research and industrial and industrial electron beam equipment can be easily adapted to the production of these materials. **Originality.** A new technological scheme of EB-PVD with directed steam flow, the efficiency of which is $\approx 50\%$, is proposed. This scheme allows the deposition of steam from the mountain to the bottom, including on flat surfaces of banding materials. **Practical value.** Areas of practical application of NPs and compositions based on them can be divided into the following areas: providing or enhancing antiviral and antimicrobial properties of new or existing medical devices (bandages, masks, wipes).

Key words: nanoparticles, electron beam technology, composites, vacuum, evaporator, bandage, silver, copper, banding materials.

REFERENCES

- Burrell, R. E., Morris, L. R. (1997). Antimicrobial coating for medical devices / US 5681575A.
- Cai, H., Xiaofei, L., Ziyi, Z. Harnessing bio-compatible nanofibers and silver NPs for wound healing: Sandwich wound dressing versus commercial silver sulfadiazine dressing. *Materials Science & Engineering*. №128. pp. 1–11.
- Choudhury, H., Pandeya, M., Qing, Y. L. (2020). Silver nanoparticles: Advanced and promising technology in diabetic wound therapy. *Materials Science & Engineering*. №112. pp. 1–16.
- Dumville, J. C., Gray, T. A., Walter, C. J. (2016). Dressings for the prevention of surgical site infection. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. №12. pp. 1–12.
- McHugh, S., Corrigan, M., Hill, A. (2011). The role of topical antibiotics used as prophylaxis in surgical site infection prevention. *Journal Antimicrob Chemother*. №66. pp. 693–701.
- Borges, A., Serra, S., Cristina, A. A. (2014). Evaluation of the effects of selected phytochemicals on quorum sensing inhibition and in vitro cytotoxicity. *Biofouling*. №2. pp. 95–183.
- Donlan, R., Costerton, J. (2002). Biofilms: survival mechanisms of clinically relevant microorganisms. *Clin Microbiol*. №15. pp. 167–193.
- Elechiguerra, J., Burt, J., Morones, J. (2005). Interaction of silver nanoparticles with HIV-1. *Journal Nanobiotechnology*. №3. pp. 3–6.
- Marambio, J., Hoek, E. (2005). A review of the antibacterial effects of silver nanomaterials and potential implications for human health and the environment. *Journal Nanopart Res*. №12. pp. 1531–1551.
- Gornostai, O. V. (2021). Evoliutsiia stabilnosti nanochastynok Ag ta Cu v dyspersnykh systemakh otrymanykh metodom fizychnoho osadzhennia u vakuumi [Evolution of stability of Ag and Cu nanoparticles in dispersed systems obtained by physical deposition in vacuum]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*. №3 (25). pp. 14–23. [in Ukrainian]
- Vershok, A. B., Dormashev, A. B., Marhulev, I. Ya. (2006). Polucheniye nanoporoshkov vakuumnym impul'sno-dugovym metodom [Obtaining nanopowders by vacuum pulse-arc method]. *Voprosy atomnoi nauky i tekhniki*. №2. pp. 31–40. [in Russian]
- Savelyev, Yu., Gonchar, A., Movchan, B., Gornostai, O., Vozianov, S., Rudenko, A., Rozhnova, R., Travinskaya, T. (2016). Novel biologically active polyurethane materials containing silver and copper nanoparticles. *Polimernyi zhurnal*. Vol. 38. № 3. pp. 255–260.
- Makhynia, L. M., Movchan, B. O., Gornostai, O. V. (2017). Effect of silver nanoparticles on the physical and chemical properties of plant oil sand the antimicrobial activity. *BIOTECHNOLOGIA ACTA*. №6. pp. 35–44.
- Gornostai, A. V., Kovinskii, I. S. (2012). Nanorazmernye diskretnye pokrytiia oksida medi na kristallakh khlorida natriia, osazhdennye iz parovoi fazy v vakuume [Nano-sized discrete coatings of copper oxide on sodium chloride crystals, deposited from the vapor phase in a vacuum]. *Sovremennaiia elektrometallurgiiia*. № 2. pp. 50–52. [in Russian]

15. Dressings: Absorbent ACTICOAT™ 7 antimicrobial dressing with silver nanocrystals SILCRYST™. (2013). Smith & Nephew Medical Limited. URL: <https://www.smith-nephew.com/key-products/advanced-wound-management/acticoat/>.
16. Kirketerp-Moller, K., Zulkowski, K., James, G. (2011). Chronic Wound Colonization. Infection and Biofilms. Biofilm Infections. Denmark. Koege: Koege University Hospital. pp. 11–24 pp.
17. Dovnar, R. I. (2011). Antibakterial'nyy effekt binta meditsinskogo marlevogo, sodержashchego nanochastitsy serebra ili zolota, pri odnoremennom vozdeystvii lazernogo izlucheniya [Antibacterial effect of a medical gauze bandage containing silver or gold nanoparticles, while exposed to laser radiation]. *Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta*. №4. pp. 46–49. [in Russian]
18. Dovnar, R. I. (2010). Antibakterial'nyy i protivogribkovyy effekt perevyazochnogo materiala, sodержashchego nanochastitsy serebra [Antibacterial and antifungal effect of dressings containing silver nanoparticles]. *Novosti khirurgii*. V. 18. № 6. pp. 3–11. [in Russian]
19. Movchan, B. A. (2006). Inorganic materials and coatings produced by EB PVD. *Surface Engineering*. Vol. 22. pp. 35–46.
20. Movchan, B. A., Kovinsky, I. S. (2013). Nanostrukturnye pokrytiia serebra i medi na poroshkakh neorganicheskikh i organicheskikh veshchestv, osazhdaemye iz parovoi fazy v vakuume [Nanostructured silver and copper coatings on powders of inorganic and organic substances, deposited from the vapor phase in a vacuum]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy sovremennogo materialovedeniia*. Vol. 2. pp.127–139. [in Russian]
21. Movchan, B. O., Yakovchiuk, K. Iu. (2011). Prystroi ta sposib elektronno-promenevoho vyparyvannia y spriamovanoho osazhenniia parovoho potoku na pidkladku u vakuumi [Device and method for electron beam evaporation and directional vapor deposition on vacuum substrate]. Pat. 98085 Ukraina C23C 14/24, C23C 14/28, C23C 14/30. [in Ukrainian]
22. Movchan, B. A. (2016). Discrete nanosized metallic coatings produced by EB-PVD. *Surface Engineering*. №32. pp. 258–266.
23. Tomaszewska, E., Soliwoda, K., Kadziola, K. (2013). Detection Limits of DLS and UV-Vis Spectroscopy in Characterization of Polydisperse Nanoparticles Colloids. *Journal of Nanomaterials*. pp. 1–10.
24. Metodicheskie ukazaniia (2003). Opredelenie khimicheskikh elementov v biologicheskikh sredakh i preparatakh metodami atomno-emissionnoi spektrometrii s induktivno-sviazannoi plazmoi i massspektrometrii s induktivno-sviazannoi plazmoi [Determination of chemical elements in biological media and preparations by atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma and mass spectrometry with inductively coupled plasma]. Moskva, 16 p. [in Russian]
25. Tomson, M., Uolsh, D. N. (1998). Rukovodstvo po spektrometricheskomu analizu s induktivno-sviazannoi plazmoi [Inductively Coupled Plasma Spectrometric Analysis Guide]. Moskva, 288 p. [in Russian]

Стаття надійшла 01.12.2021